

열 모드 해석을 이용한 스피들의 열 변위 예측 Spindle Thermal Distortion Prediction using Thermal Modal Analysis

*한준안¹, #이선규¹

*J. A. Han¹, #S. K. Lee(skyee@gist.ac.kr)¹

¹광주과학기술원 기전공학부

Key words : Thermal modal analysis, Spindle, Machine tool

1. 서론

공작기계의 정확도 향상은 대부분의 고생산성, 고품질, 엄격한 허용 오차가 있는 제품의 수요 증가로 인해 업계, 학계 모두에서 인정받고 있다. 공작기계의 정확도는 결국 제품의 치수 정밀도를 결정하는데, 여기에 가장 큰 영향을 미치는 요인인 열 오차는 전체 오차의 약 60%를 차지한다. 이런 열 오차 문제를 해결하기 위한 방법에는 구조설계, 열원차단, 열 변형 예측 및 보상 등이 있다. 여기서 열 보상 방법의 가장 중요한 요소는 정확하고 강건한 모델을 만드는 것이지만, 이런 방법들은 시간-비용 측면에서 단점을 가지고, 열-구조적 메커니즘을 적절히 고려하지 못했다. Zhu는 이것을 극복하기 위해 모델링에 열 모드 개념을 적용하였다.[1] 이 방법은 센서위치를 열 모드를 통해 찾고, 열 오차 모델을 만드는 것이다. 따라서 본 연구에서는 이런 열 모드 해석을 통한 센서 위치 선정 및 이를 이용한 모델링 및 수치 시뮬레이션을 통한 모델 성능 검증에 하였다.

2. 열 모드 해석 및 열 오차 모델링

스핀들 형상, 물성치, 경계조건을 고려한 1 차원 열전달 문제는 아래와 같다.

$$[C_T] \{\dot{T}(t)\} + [K_T] \{T(t)\} = \{Q(t)\} \quad (1)$$

여기서 $[C_T]$, $[K_T]$, $\{T(t)\}$, $\{Q(t)\}$ 는 각각 열 용량 행렬, 열 전도도 행렬, 노드 온도 벡터, 노드 열 하중 벡터이다.

온도 $\{T(t)\}$ 는 모드 온도 $\{\Theta(t)\}$ 로 변환 가능하다.

$$\{T(t)\} = [\Phi_T] \{\theta(t)\} \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하면 아래와 같다.

$$\{\dot{\theta}(t)\} + [\Lambda] \{\theta(t)\} = [\Phi_T]^{-1} \{Q(t)\} = \{\zeta(t)\} \quad (3)$$

여기서 $\{\zeta(t)\}$ 는 노드 열 하중 벡터이다.

식(3)의 각 행렬들의 요소를 단일 변수의 1 차미분방정식으로 표현하고 스텝 열 입력을 가하면 아래와 같이 표현된다.

$$\theta(t) = \xi_i \tau_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}) \quad (4)$$

공작기계의 전체 열 변형 과정은 몇 가지 지배적인 열 모드로 표시할 수 있다. 이 때, 각 모드의 가중치는 다음과 같이 정의된다.

$$W_i = \left| \xi_i \tau_i \right| \quad (5)$$

여기서 ξ_i 는 모드 열 하중, τ_i 는 각 모드의 시정수이다.

스핀들은 위치 독립적인 열 오차로, 온도만의 함수로 표현된다.

$$E(t) = \sum_{i=1}^N \beta_i T_i(t) \quad (6)$$

여기서 $E(t)$ 는 열 오차, t 는 시간, N 은 온도센서 개수이다.

열 오차는 온도 변화에 대해 선형적인 관계이므로 식(6)은 아래와 같이 되고, $[B]$ 를 구할 수 있다.

$$[E] = [T] [B] \quad (7)$$

$$[B] = ([T]' [T])^{-1} [T]' [E] \quad (8)$$

여기서 $[T]$ 는 시간 t 동안 측정된 온도 행렬, $[B]$ 는 선형회귀법으로 계산된 계수행렬이다.

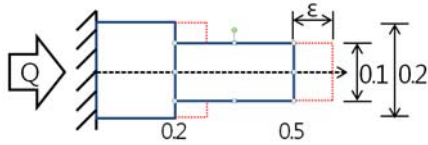


Fig. 1 1D model of a spindle

Table 1 Model properties of spindle system

Properties	Value	Unit
$T(t_0)$	20	$^{\circ}\text{C}$
K	49.8	$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
c	486	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
ρ	7850	kg/m^3
t_{ext}	20	$^{\circ}\text{C}$
Q	1000	W/m^2
h	20	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$

Table 2 Dominant mode information

Mode	Weight	Time constant
1	90.37%	6720s
2	8.018%	1738s
4	0.369%	265.9s
15	0.269%	67.54s
20	0.465%	54.41s

3. 모드해석 통한 온도 센서 위치 선정

Fig. 1 은 스피들과 경계 조건을 보여준다. 열 입력 Q 는 고정 단의 모터에서 생성되고, 표면과 대기 사이엔 열 대류가 존재한다. Table 1 은 시스템의 변수들을 나타낸다.

240 개의 요소로 된 모델에 22 개의 고유값을 구하여 가중치 순으로 5 개의 모드를 사용하였다. Table 2 는 5 개의 모드들에 대한 정보를 나타낸다. 이에 근거하여 각 모드들의 노드점이 되는 스피들의 0.02, 0.22, 0.32, 0.49m 지점을 온도센서 위치로 선정하였다.

4. 모델링 및 검증

Fig. 2(a)는 스피들에 입력되는 열 입력 Q 를 나타낸다. 앞에서 선정한 온도센서들에서 얻어진 온도 값과 스피들 끝 단의 열 변형 값을 이용하여 온도변화 $T(t)$ 와 열팽창 $e(t)$ 의

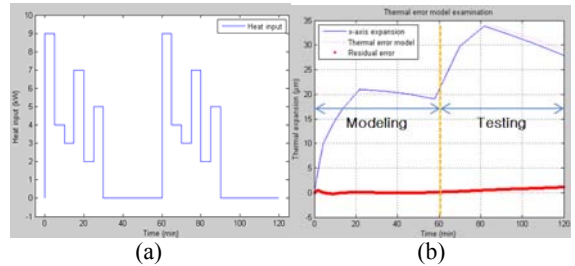


Fig. 2 (a)Heat input Q , (b) Modeling and Testing

관계식으로 구성된 수학적 모델을 다음과 같이 만들었다.

$$\varepsilon(t) = 1.08T_1(t) + 7.36T_2(t) - 9.30T_3(t) + 9.16T_4(t) \quad (9)$$

Fig. 2(b)는 시작점에서 60 분까지의 온도와 열 변형 값으로 식(9)와 같이 모델링하고, 이 모델에 60 분에서 120 분 사이의 온도 값을 입력하여 계산된 열 변형 값과 시뮬레이션으로 얻은 열 변형 값을 비교한 것이다. 이 테스트에서 열 팽창 최대 $34 \mu\text{m}$, 최대 오차 $1.13 \mu\text{m}$, 열 변형에 대한 예측오차 비율의 평균값 1.54%로 모델이 정확함을 확인했다.

4. 결론

본 연구를 통해 열 모드 해석으로 스피들의 온도 센서 위치를 선정하였고, 이를 모델링하여 수치 시뮬레이션을 통해 모델의 성능 검증을 하여 모델이 정확함을 확인했다.

후기

이 논문은 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단 국가 연구실사업의 지원(no 20120006271)과 기계정밀도 시뮬레이션 플랫폼 기술 개발 과제, 지식경제부 광역경제권연계협력사업의 지원(2010-H-003-00030100-2010)으로 수행 되었습니다.

참고문헌

1. J. Zie, J. Ni, and A. Shih, "Robust Machine Tool Thermal Error Modeling through Thermal Mode Concept", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 130, 061006-1~9, 2008